

氏 名	野 坂 利 也
生 年 月 日	
本 籍	北海道
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	博甲第 531 号
学位授与の日付	2002 年 9 月 30 日
学位授与の要件	課程博士（学位規則第 4 条第 1 項）
学位授与の題目	自律適応型大腿義足の開発と歩行・動作分析による性能評価
論文審査委員(主査)	山越憲一（自然科学研究科・教授）
論文審査委員(副査)	佐藤 秀紀（工学部・教授） 神谷 好承（自然科学研究科・教授） 田中 志信（自然計測応用センター・助教授） 横串 算敏（札幌大学・教授）

## 学 位 論 文 要 旨

We have designed a new knee joint, which utilizes a hydraulic cylinder in the stance phase and a microprocessor-controlled pneumatic cylinder in the swing phase. In this study, the gait performances of this knee joint were tested in 3 trans-femoral amputees, comparing with a commercially available knee joint, Otto Bock 3R60, which is at present alleged to provide a higher gait performance. An electronic metronome was used for step duration so as to make the subject with cadences of 88, 96 and 104 steps/min. And we were analyzed for the gait performances on a slippery surface as a simulated icy surface. Vicon 140 system was used, particularity focusing on the motion measurements of hip and knee flexion angles as well as hip moment in a sagittal plane.

As results, this knee joint showed stabler and superior in terms of gait performance rather than Otto Bock 3R60 at different cadences. The newly designed knee joint appears promising to serve as a superior prosthesis for the trans-femoral amputees.

## 1. 緒言

義足で代償しなければいけない身体機能のうち、最も重要なのが歩行機能である。義足歩行では、できるだけ健常者に近いことが望まれている。現在下腿切断者についてはかなり健常者に近い歩行を獲得できている。しかし大腿切断者においては、必ずしも十分な歩行を獲得できていない。特に膝継手の重要性は明らかで一般に使用されているものの中には、高い安定性を有するもの、歩行速度への追従性が良いものなどがあるが、両方の機能を発揮する膝継手がほとんどないのが実情である。

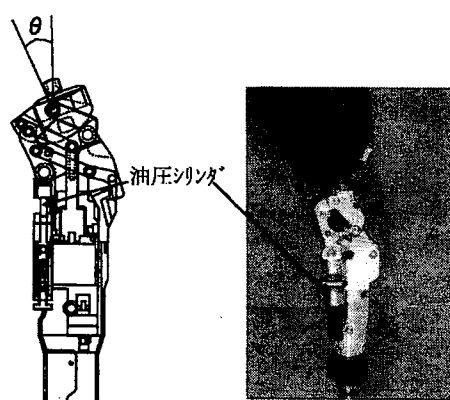
## 2. 研究目的

本研究では、このような実情を鑑み新しい膝継手を開発した。開発した膝継手の性能評価を行うため市販膝継手で高い安定性を有する膝継手使用時との比較を大腿切断者の歩行分析で行った。

## 3. 義足膝継手の開発

試作膝継手は、特殊なリンク構造の採用により立脚相と遊脚相で異なる方式の制御を作用させることが可能である。図1に概略図と写真を示す。図1(a)は立脚相における膝の小屈曲 ( $\theta = 0 \sim 11^\circ$ ) を示し、油圧シリンダ (太陽鉄工㈱、A2M20) を用いて bouncing の柔らかさを制御した。図1(b)は遊脚相における大屈曲 (通常  $\theta = 0 \sim 70^\circ$ ) を示す。屈曲した義足を伸展させるために、マイコン制御式空圧シリンダモジュール (㈱ナブコ、TC32x48RC) を用いた。

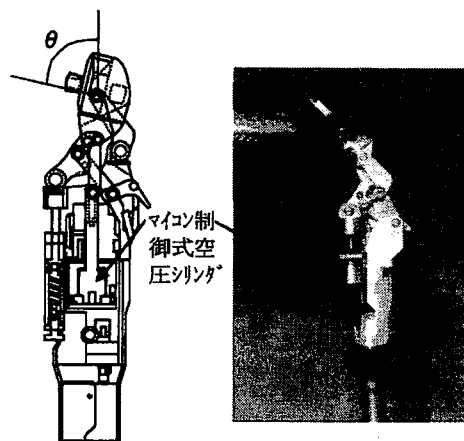
図2(a)は荷重が加わらない状態であり、膝は完全に伸展している (リンク1の角度が最小)。ストッパ5は前方リ



(a) 立脚相における膝小屈曲

リンク 2 に当たっている。このとき、中間リンクであるリンク 8 とリンク 9 の角度 ( $\angle FED'$ ) は 180 度以下である。荷重が加わると、図 2(b) の状態のようにリンク 4 および四節リンク機構 (ABCD) は  $D'$  を中心に反時計まわりに回転し、リンク 9 がストッパ 6 に当たる。さらに回転すると、図 2(c) のようにリンク 8 とリンク 9 が一直線になる。このとき、ストッパ 5 はゴムなどの弾性体であるので、 $\angle FED'$  の変化はストッパ 5 を変形させながら、B と D の距離を長くするように四節リンク機構 (ABCD) を変形させる。その結果、膝関節の瞬間回転中心 (リンク 1 の瞬間回転中心に相当) は当初の位置から後方かつ上方の位置に移動し膝関節は膝折れに対して安全な方向に働く。

さらに荷重が加わると、図 2(d) に示すようにリンク 4 の回転角度はさらに大きくなる。 $\angle FED'$  は 180 度より大きくなり、リンク 9 の延長部がストッパ 7 に当たるようになる。これはロック状態で



(b) 荷重のかかっていない時の膝大屈曲

図1 開発した膝継手の概略図と写真

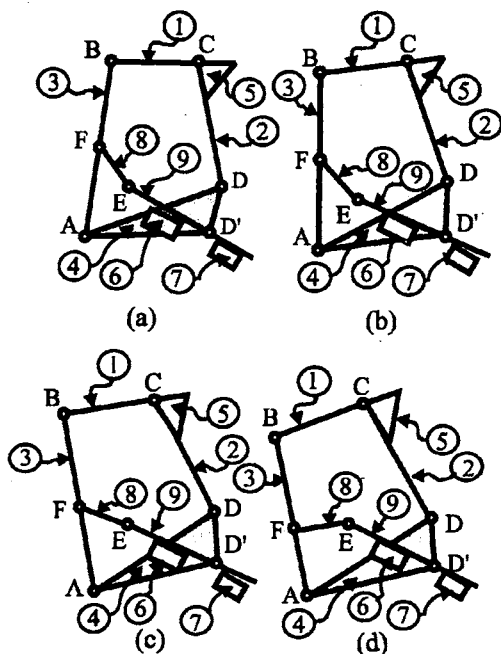


図2 立脚相におけるリンクの動き

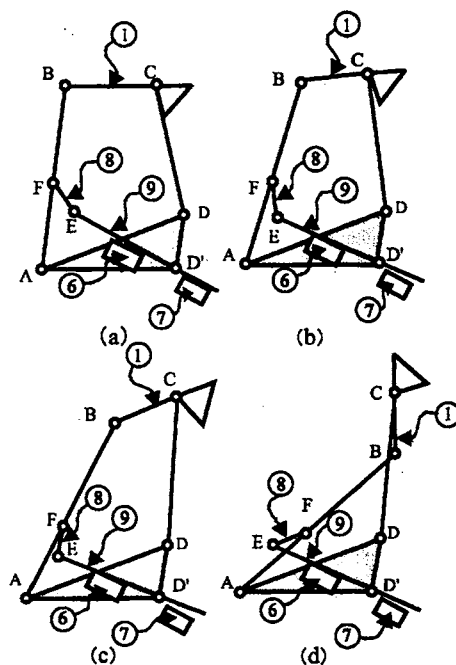


図3 遊脚相におけるリンクの動き

あり、荷重を減じないかぎり膝折れは起こらない。リンク 4 の回転は油圧シリンダによって規制されているので、膝の小屈曲は油圧シリンダによって制御される。また、ロック時の膝の最大角度は  $11^{\circ}$  である。

図 3 は遊脚相における動作を示す。図 3(a)から図 3(d)に状態がすすむにつれて、次第に膝の屈曲角度（リンク 1 の角度に相当）が大きくなっている。遊脚相では荷重がかからないので、リンク 4 は回転せず初期の状態を保っている。 $\angle FED'$ はどれも  $180$  度よりも小さく、中間リンクであるリンク 8 およびリンク 9 は、ストッパ 6 やストッパ 7 に当たることがない。したがって、四節リンク機構 (ABCD) の変形は油圧シリンダの制御を受けることなしに変形することができる。

以上のことから、試作した膝継手は立脚相での安定性が高く、油圧シリンダにより制御された小屈曲動作が可能である。遊脚相では、油圧シリンダがマイコン制御式空圧シリンダによるインテリジェント制御を妨げることはないので、良好な歩行速度追従性が得られる。

#### 4. 歩行分析による性能評価

##### 1) 対象及び方法

2 種類の膝継手の基本性能は表 1 のごとくである。大腿切断者は 3 名（29/26/28 歳男性）とした。

歩行分析システムは三次元動態分析装置 VICON140 と床反力計 2 枚を同期させて計測を行った。計測周波数は、 $60\text{Hz}$  とした。歩行動作の計測は、被験者の両側の肩峰、

表1 膝継手の基本性能

	試作膝継手	Otto Bock 3R60
重 量	1.2kg	0.96kg
立脚相での最大膝屈曲角度	$11.2^{\circ}$	$15^{\circ}$
立脚相での制御	油圧シリンダー	弾性ゴム
遊脚相での最大膝屈曲角度	$155^{\circ}$	$140^{\circ}$
遊脚相での制御	マイコン制御の空圧シリンダー	油圧シリンダー

股関節、膝関節、足関節、第 5 中足骨骨頭に反射マーカを取り付けた。

通常の路面で 3 種類のケーデンス 104,96,88 (steps/min.) で歩行速度追従

性の分析を行った。また大腿切断者が最も歩行困難な状況といえる凍結した路面での滑りやすい状況を、歩行路面にビニールシートを敷き詰めオリーブオイルを塗布することにより、模擬凍結路面として主に安全性についての歩行実験を行った。

## 2) 結果

### ① 通常の路面でのケーデンスの違い

被験者 3 名ともに特に膝関節角度変化に特徴的な違いが見られた。3 名の被験者の膝継手角度、義足側股関節角度、義足側股関節モーメントを表 2 にまとめた。

表2 被験者ごとの義足膝屈曲角度、股関節角度、股関節モーメントのピーク値

パラメータ特性値	被験者	歩調(steps/min.) 試作膝継手				Otto Bock 3R60			
		104	96	88	F値	104	96	88	F値
膝屈曲peak値(°) (立脚相)	A	3.4±0.5	3.3±0.4	3.2±0.4	0.041	6.1±0.8	5.7±0.6	6.2±0.5	0.476
	B	4.6±0.6	5.0±0.4	4.2±0.4	0.242	5.7±0.7	3.9±0.6	3.6±0.6	10.346*
	C	9.6±0.6	9.1±0.5	10.1±0.6	2.192	11.1±0.7	10.1±0.5	10.4±0.5	2.433
膝屈曲最大値(°) (遊脚相)	A	47.9±3.5	46.0±2.7	45.0±2.5	0.774	45.7±4.2	40.7±3.5	32.6±4.2	8.306*
	B	60.4±3.6	58.3±3.4	60.8±3.5	0.461	70.5±4.8	68.1±3.7	53.4±3.9	14.794**
	C	44.6±4.3	52.4±3.6	41.5±3.7	6.292*	80.8±5.2	74.7±4.7	53.8±4.8	12.125**
股屈曲最大値(°)	A	20.1±2.7	19.3±2.6	20.3±2.7	0.125	21.3±3.3	21.6±3.5	21.0±3.1	0.022
	B	22.0±3.6	23.7±3.1	18.1±3.2	2.29	31.5±3.7	24.7±3.6	22.3±3.2	5.554*
	C	20.7±3.2	21.7±2.7	19.3±3.4	0.466	38.8±4.2	29.5±3.2	29.9±3.6	6.052*
股伸展最大値(°)	A	18.9±1.7	18.3±1.9	17.5±2.3	0.369	18.8±2.3	17.8±2.3	19.3±2.1	0.344
	B	20.8±1.7	20.7±1.5	24.1±1.8	3.937	20.5±2.4	22.2±2.1	19.8±2.2	0.895
	C	12.8±2.1	13.1±1.9	13.9±2.0	0.235	13.5±1.9	13.6±2.1	15.6±1.8	1.131
股関節伸展モーメント 最大値(N/m)	A	39.5±8.2	37.1±8.6	39.3±8.5	0.074	55.7±10.5	34.6±9.5	40.8±7.5	4.101
	B	37.5±8.4	26.0±6.8	17.7±7.5	5.148*	39.2±9.7	24.2±8.6	22.9±6.8	3.437
	C	51.3±9.5	47.0±8.5	40.6±7.6	1.174	56.2±10.5	69.2±13.5	36.8±11.4	5.686*
股関節屈曲モーメント 最大値(N/m)	A	15.7±7.5	16.5±6.7	12.9±5.9	0.239	14.9±6.7	19.5±5.7	20.1±7.5	0.556
	B	19.1±7.8	30.9±12.2	19.9±11.7	1.125	41.5±7.5	40.9±6.4	38.3±5.6	0.201
	C	16.2±11.3	22.4±5.4	13.2±2.4	1.213	33.6±7.5	30.6±4.5	25.1±6.4	0.313

\*:p<0.05 \*\*:p<0.01 (ANOVAによる有意水準)

### ② 模擬凍結路面での歩行

図 4 には模擬凍結路面上での歩行における膝関節角度変化を健常者と大腿切断者の代表的な 1 名のデータを示す。被験者 3 名ともに開発した膝継手においては立脚中期での bouncing が見られた。

しかし Otto Bock 3R60 では 3 名中 2 名は bouncing が消失して、膝伸展位で歩行していた。

## 3) 考察

通常の路面では歩行速度追従性が高いことが確認され、模擬凍結路面のような危険な状況下での歩行では立脚中期に健常者に類似した膝小屈曲位で歩行

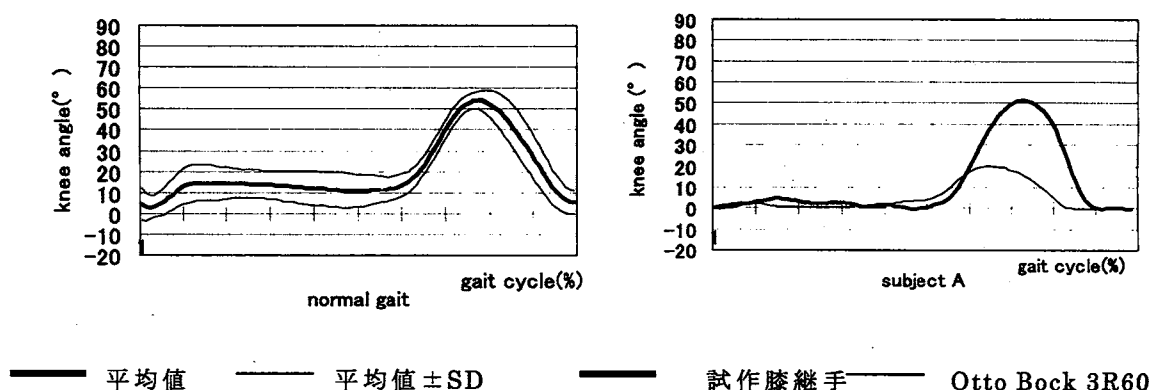


図 4 模擬凍結路面上での膝関節角度変化

可能であり、一度被験者に合わせた膝の調整を行えば、従来の膝継手よりも安全性、歩行速度追従性の高い膝継手が開発されたことが確認された。

## 5. まとめ

特殊なリンクを採用し、立脚相制御には油圧シリンダ、遊脚相制御にはマイコン制御の空気圧シリンダを用いることにより、従来の膝継手よりも健常者に近い歩容、高い安全性、速度追従性を獲得できた。実用化へ向けて軽量化などの改良を加えてさらに機能の向上を図りたい。

## 学位論文審査結果の要旨

本学位論文に関して、平成 14 年 7 月 15 日に第 1 回学位論文審査委員会を開催し、提出された論文および関連資料について検討した。平成 14 年 7 月 31 日の口頭発表後、第 2 回審査委員会を開催し、慎重に協議の結果、以下のとおり判定した。

高齢社会を迎え、病気や事故などによる下肢切断者の比率が増加する現状で、特に正常歩行を獲得できる大腿義足の開発が求められている。本論文は大腿義足の中でも最も重要な要素である新しい膝継手の開発と性能評価に関する研究である。開発膝継手は、特殊なリンク構造の採用により、立脚相では油圧シリンダで制御しながら膝小屈曲を可能とし、遊脚相ではマイコン制御の空圧シリンダを用い、高い歩行速度追従性を発揮するといった新しい制御方式を用いている。また性能評価として、通常平地路面および模擬凍結路面において健常者歩行と大腿義足歩行(開発膝継手と現在汎用されている市販膝継手を使用)との比較検討を行っている。その結果、開発膝継手は異なる歩調での歩行においても自律適応できる速度追従性能が得られ、健常者歩行に類似した歩行性能を示し、市販膝継手と比べて明らかな優位性を確認している。

以上、本研究は新しい制御方式を導入することにより健常者歩行に類似した大腿義足の開発に成功しており、実用性の高い技術として評価できる。よって、本論文は博士(工学)論文に値するものと判定する。